

PREDICTION DE LA RETENTION DU PHOSPHORE PAR LA CHIMIOMETRIE (Cas du Tanety de Madagascar)

Razakavololona A.^{1,2}, Ramaroson H. V.^{1,5}, T. Becquer³, N. Rabetokotany-Rarivoson^{4,5}

¹Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, complexe scolaire Ampefiloha, BP 881-101 Antananarivo

²Ecole Doctorale Problématique de l'Education et Didactique des Disciplines (PE2Di) - Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, complexe scolaire Ampefiloha, BP 881-101 Antananarivo

³Institut de Recherche pour le Développement, UMR Eco&Sols, 2 Place de Viala 34000 Montpellier

⁴Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, BP 1500-101 Antananarivo

⁵Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Université d'Antananarivo, BP 1500, 101 Antananarivo

Auteur correspondant : RAMAROSON Henintsoa Volaniaina

Email : volaniainah.ramaroson@gmail.com

Téléphone : +261 34 86 009 58

Résumé

Cet article vérifie l'importance de la chimométrie sur la prédiction des constituants minéraux et des propriétés physico-chimiques du sol notamment la sorption du P dans le sol. Certains modèles de prédiction ont déjà été publiés dans des articles internationaux comme le cas des modèles de la kaolinite et de la gibbsite. Ces éléments minéraux contribuent à la forte sorption de P dans le sol et diminuent sa disponibilité dans la solution du sol. Des ouvrages ont montré que le P est difficilement prédictible. Concernant notre recherche, 600 échantillons ont été prélevés sur le long de la route nationale des Hautes Terres de Madagascar avec des profondeurs de 0-10, 10-20, 20-30, 50-60 et 80-90 cm ; dont 148 échantillons ont été

sélectionné représentativement à partir de leur spectre. Ces échantillons ont été analysés pour mesurer la teneur de la sorption de P (P_{rem}) dans les sols ferrallitiques étudiés. Il a une teneur entre min-max de 1,2 à 47,4 mg kg⁻¹. En effet, cet élément est mieux prédit par la méthode de fonction pédotransfert (PTF) par rapport à la méthode de PLSR; avec un $R^2 = 0,74$ et 0,61, réciproquement. D'autant plus, la PTF explique bien également la corrélation des constituants minéraux (les hydroxides de Fe, de la Gb et le sable) contribuant à la sorption de P dans les sols ferrallitiques (Tanety) de Madagascar. Cet article a alors pour objectif de présenter la performance de la spectrométrie infrarouge à prédire la sorption de P dans les tanety.

Mots clés : chimométrie, fonction pédotransfert, méthode mPLS, sol ferrallitique, sorption du P, spectre.

Abstract

The development of techniques for the rapid, inexpensive and accurate determination of mineral constituents and physico-chemical properties of soil including the phosphorus sorption (P_{rem}) in soils which is important for P management in highly weathered tropical soils. Prediction of kaolinite (Kt) and gibbsite (Gb) models have already been published in international publications. These mineral elements contribute to the high sorption of P in soil and reduce its availability in soil solution. Literature has shown that P is difficult to predict. This is the reason why, the objective of this article is to present the performance of infrared spectrometry in predicting P sorption in ferrallitic soils. Therefore, 600 samples were taken along the national road of the Highlands of Madagascar with depths of 0-10, 10-20, 20-30, 50-60 and 80-90 cm ; of which 148 samples were selected representatively from their spectrum. The predictions were based on chemometric methods using multivariate calibration models with partial least squares (PLS) regressions, and pedotransfer functions (PTF). These samples were analyzed to measure the content of P sorption (P_{rem}) in ferrallitic soil studied. It has a content between mi-max of 1,2 to 47,4 mk kg⁻¹. Indeed, this element is better predicted by the pedotransfer function (PTF) method compared to the PLSR method ; with an $R^2 = 0,74$ and 0,61 reciprocally. Moreover, the PTF also explains well the correlation of mineral constituents (Fe hydroxides, Gb and sand) contributing to P_{rem} in the ferrallitic soil of Madagascar.

Key words : mineral constituents, physico-chemical, phosphorus sorption, kaolinite, gibbsite, , infrared spectrometry, PLS, pedotransfer function.

1. INTRODUCTION

Le phosphore (P) est l'un des principaux nutriments limitant la croissance des plantes. La déficience en P disponible dans les sols est l'une des principales contraintes pour la production végétale dans les sols tropicaux, comme par exemple Madagascar (Rabeharisoa et al., 2012). Or, dans un contexte où le P est une ressource mondiale limitée en voie de raréfaction, la demande mondiale en P devrait augmenter de 50 à 100% d'ici 2050 pour répondre aux besoins des cultures (Cordell et al., 2009). Ceci pourrait conduire à une pénurie de phosphate et des tensions sur le marché des engrais. Optimiser l'utilisation du P provenant du sol et des intrants par les plantes est donc impératif (McLaughlin et al., 2011). Elle requiert une meilleure prise en compte et quantification des processus sol-plante engagés dans la nutrition minérale phosphatée (Frossard et al., 2011).

De nombreux sols tropicaux ont une concentration en ions phosphate (PO_4) en solution extrêmement faible associée à une forte capacité de sorption des sols. Dans les sols cultivés, la concentration en PO_4 dissout varie entre $0,001 \text{ mg P l}^{-1}$ dans des sols tropicaux acides très réactifs vis-à-vis des ions PO_4 , jusqu'à plus de 1 mg P l^{-1} dans des sols de régions tempérées fertilisés avec excès. Dans les sols tropicaux, les ions PO_4 peuvent réagir avec les oxydes et hydroxydes de fer (Fe ; goethite, hématite et ferrihydrite) et d'aluminium (Al ; gibbsite), avec les minéraux argileux (par exemple, la kaolinite) ou encore avec la matière organique.

Depuis deux décennies, la spectrométrie proche et moyen infrarouge (SPIR et SMIR, respectivement) a été développée pour prédire diverses propriétés du sol (Viscarra Rossel et al., 2006 ; Cécillon et al., 2009 ; Soriano-Disla et al., 2014). Cette méthode, rapide et peu coûteuse, permet de réaliser de nombreuses mesures, ce qui est intéressant dans les pays en développement où les paysans ont très difficilement accès à des analyses de sols. La SPIR et la SMIR ont notamment été utilisées dans le cadre de ma thèse (Ramaroson, 2017). Ces travaux ont été menés grâce à un partenariat entre le Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) de

l'Université d'Antananarivo - Madagascar et l'IRD de l'UMR Eco&Sols Montpellier - France. Plus précisément, les résultats antérieurs des recherches ont été permis de proposer des modèles chimiométriques de prédiction des teneurs des principaux constituants minéraux des sols ferrallitiques malgaches (kaolinite, gibbsite, oxydes de fer) (Ramaroson et al., 2018). Toutefois, des travaux ont été mis en évidence certaines limites des méthodes chimiométriques classiques basées sur des modèles de type PLSR (*Partial Least Squares Regression*). Ainsi, des modèles ont été développé estimer le potentiel de sorption du P par les sols (Ramaroson et a., 2023), et donc de prédire indirectement la disponibilité du phosphore du sol.

L'objectif principal de ce travail est de créer un modèle de prédiction de la sorption de P à partir de la chimiométrie pour l'utiliser aux différentes exploitations agricoles comme le riz.

De ce fait, l'intérêt de cette étude est de définir les constituants minéraux qui constituent à la sorption de P et de proposer le modèle de prédiction pour évaluer cet élément. Cette publication présente une grande opportunité dans la valorisation de notre travail et au fin d'utiliser les modèles pour assurer une bonne production rizicole de Madagascar. Ceci entre dans le sous-thème 4 de ce colloque, portant le titre : le développement, l'agro-alimentaire, l'élevage et l'agriculture.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Echantillonnage

Le site de prélèvement a été effectué sur le long des Hautes Terres de Madagascar. L'échantillonnage a été présenté en détails dans le précédent article (Ramaroson, 2017 ; Ramaroson et al., 2023). Les 600 échantillons collectés, le nombre des échantillons à étudier est de Parmi 148 échantillons sélectionnés représentativement à partir de leurs données spectrales, 2 échantillons sont des outliers spectraux. Donc, 146 échantillons ont été analysés et traités.

2.2. Analyses conventionnelles et spectrales

Les analyses chimiques des constituants minéraux comme la kaolinite et la gibbsite sont détaillées dans Ramaroson et al. (2018) et les analyses physico-chimiques, comme la sorption du phosphore, sont présentées dans Ramaroson et al. (2023). Ainsi que les analyses spectrales sont déjà détaillées dans Ramaroson et al. (2018).

2.3. Fonction pédotransfert (PTF)

La fonction pédotransfert est une équation mathématique reliant des propriétés des sols entre elles et pouvant servir pour prédire des propriétés plus difficilement accessibles (Le Bas, 2017). Soit le modèle de la sorption de P ou P_{rem} est calculée en fonction des meilleurs modèles de prédiction des constituants (Gb, Kt, Fe_2O_{3cbd}) (Ramaroson, 2018) et des propriétés physico-chimiques (C, Sable) (Ramaroson, 2023). Seul le pH_{eau} est utilisé dans la formule comme étant la variable mesurée.

$$D'où : P_{rem} = f(Gb, Kt, Fe_2O_{3cbd}, C, Sable, pH_{eau}) \text{ mesurés} \quad (1)$$

$$P_{rem} = f(Gb, Kt, Fe_2O_{3cbd}, C, Sable, pH_{eau}) \text{ prédits} \quad (2)$$

Avec : P_{rem} = Sorption de P ; Gb = Gibbsite ; Kt = Kaolinite ; Fe_2O_{3cbd} = Oxyhydroxide de fer par Citrate-Bicarbonate-Dithionite ; C = Carbone.

Les analyses de la fonction pédotransfert est bien détaillée dans Ramaroson et al. (2023).

2.4 Analyses des données

Les traitements statistiques sont réalisés à partir d'un logiciel statistique libre R version 3.2.3 (R Core team, 2015). Tout d'abord, une régression linéaire multiple a été effectuée pour élaborer l'équation de P_{rem} . On a utilisé le modèle de P_{rem} obtenu à partir des spectres NIRS (Ramaroson, 2023). Ensuite, le modèle de P_{rem} obtenu par PTF est comparé à celui obtenu par le PLSR. Les paramètres de détermination du modèle pour le PTF sont le R^2 de détermination et le RMSE. Les paramètres de détermination du modèle pour le PLSR sont le R^2_c et RPD_c . Enfin, une validation de ces modèles a été effectuée pour voir lequel de ces deux modèles sont les meilleurs. Ces modèles ont été élaborés à partir d'un intervalle de confiance de 95% et de prédiction de 95%. Les paramètres de détermination du modèle sont les R^2 de détermination et $p\text{-value} < 0,05$.

3. RESULTATS

3.1. Analyses conventionnelles

Le tableau 1 montre la distribution de la teneur de la Gb, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{cbd}}$, Sable et le P_{rem} dans les sols ferrallitiques étudiés.

La Gb a une teneur min-max de 0,0 – 456,2 g kg^{-1} avec une moyenne \pm SD de $109,9 \pm 116,9$ g kg^{-1} . Le $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{cbd}}$ a une teneur min-max de 0,0 – 181,4 g kg^{-1} avec une moyenne \pm SD de $42,4 \pm 30,5$ g kg^{-1} . Le S a une teneur min-max de 426 – 901,6 g kg^{-1} avec une moyenne \pm SD de $451,6 \pm 199,1$ g kg^{-1} . Le P_{rem} a une teneur min-max de 1,2 – 47,4 g kg^{-1} avec une moyenne \pm SD de $23,1 \pm 9,5$ g kg^{-1} .

3.2. Comparaison des modèles de P_{rem} par PTF et PLSR

Le tableau 2 présente la différence des modèles de P_{rem} obtenue à partir de PLSR et de PTF. L'équation 1 a été obtenue à partir de PLSR. Le modèle de P_{rem} a un R^2_c de 0,70 et de RPD_c 1,8. L'équation 2 a été obtenue à partir de PTF dont la fonction x contient les variables mesurées des échantillons les plus représentatives. Le modèle de P_{rem} a un R^2_c de 0,46 et de RMSE 6,89. L'équation 3 a été obtenue à partir de PTF dont la fonction x contient les meilleures prédictions des échantillons les plus représentatives. Le modèle de P_{rem} a un R^2_c de 0,43 et de RMSE 7,09.

Pour les deux dernières équations, les variables qui contribuent à la sorption de P_{rem} sont la Gb, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{cbd}}$ et le sable.

3.3 Validation des modèles de P_{rem} par la méthode de PLSR et de PTF

La figure 1 présente la validation des modèles de P_{rem} par le PLSR et de P_{rem} par la PTF. La figure 1a montre que le modèle du P_{rem} obtenu par le PLSR a un R^2 de 0,61, un p-value $< 2,2 \times 10^{-16}$ qui est très significatif. Le nombre des échantillons prédit est 141 échantillons dont 5 échantillons ne sont pas prédits et qui se trouvent à l'extérieur des intervalles de prédiction. La figure 1b montre que le modèle du P_{rem} obtenu par la PTF a un R^2 de 0,74, un p-value

$<2,2e-16$ qui est très significatif. Le nombre des échantillons prédit est 139 échantillons dont 7 échantillons ne sont pas prédits et qui se trouvent à l'extérieur des intervalles de prédiction.

4. DISCUSSIONS

4.1. Relation entre P_{rem} et les caractéristiques des sols

La forte sorption de P dans les Ferralsols est souvent liée à la présence de grandes quantités d'oxydes de Fe et d'Al (Uehara et al., 1981 ; Dubus et al., 2001). Par ailleurs, il y a une plus grande corrélation entre la capacité d'adsorption de P et le contenu en gibbsite qu'entre la capacité d'adsorption P et le contenu en goethite (Hun et al., 2007 ; Pozza et al., 2009 ; Rolim et al., 2004 ; Schaefer et al., 2004 cités par Camargo et al. (2013)) dans Ramarosan (2017). Nos résultats montrent très clairement que la sorption de P est associée à l'importance des teneurs en gibbsite (cf. Tableau 1, équations 2 et 3). En effet, les valeurs faibles de P_{rem} , qui indique une forte sorption du P, sont associées aux teneurs élevées de gibbsite.

La teneur moyenne en P_{rem} prédit de nos sols est de 27 mg l⁻¹ (Ramarosan, 2017), ce qui est similaire à celles rencontrées dans des sols ferrallitiques (Latosols) au Brésil qui ont une teneur moyenne en P_{rem} de 24 mg l⁻¹ (Vendrame et al., 2012 ; Ramarosan, 2013).

La sorption de P dans les sols ferrallitiques est souvent liée aux charges variables des surfaces d'adsorption. Ces charges variables sont issues de la (dé)protonation de molécules amphotères (matières organiques, oxydes de fer et d'aluminium, dans une moindre mesure kaolinite), qui sont des composés importants des sols tropicaux (Uehara et al., 1975 ; Pieri, 1975 ; Pieri, 1977 ; Ramarosan, 2017). Dans les sols riches en fer (sols sur roches mafiques, notamment), l'effet des oxydes de fer peut s'ajouter à celui des oxydes d'aluminium pour favoriser la sorption du P (cf. Tableau 1, équations 2 et 3). La texture (cf. Tableau 1, équations 2 et 3), notamment la teneur en sable, a aussi un effet sur la sorption du P (Ramarosan, 2017).

4.2. Comparaison des modèles de P_{rem} par PLSR et PTF

L'objectif d'utilisation de la spectrométrie infrarouge est d'abaisser les coûts des analyses en laboratoire, permettant ainsi un gain de temps et permettant aussi à un nombre plus large d'acteurs intervenant dans le domaine de l'agriculture (agriculteurs, techniciens du

développement) d'accéder à des analyses de sols (Ramaroson, 2017). Notre étude avait donc pour objectif de trouver des méthodes de spectrométrie infrarouge pour pouvoir caractériser les constituants et les propriétés physico-chimiques du sol (Ramaroson et al., 2018 ; Ramaroson et al., 2023), et de proposer des modèles chimiométriques utiles aux bénéficiaires finaux (agriculteurs...) (Morón et al., 2003).

Nos résultats concernant le modèle du P_{rem} par le PLSR, le modèle de prédiction est faible pour un RPD compris entre 1,5 et 2,0 (cf. Tableau 1, équation 1) (Chang et al., 2001 ; Dunne et al., 2020). Par ailleurs, il a un R^2 supérieur à 0,65, qui est considéré comme acceptable selon Chang et al. (2001), Dunne et al. (2020), Morón et Cozzolino (2003), Janik et al. (2007). Ce qui fait que, ce modèle n'est pas suffisant pour être utilisé et il est moins bon par rapport à celui du modèle par PTF (cf. Figure 1b). Ce dernier est classé acceptable avec un $R^2=0,74$ (Chang et al., 2001 ; Dunne et al., 2020 ; Morón et al., 2003).

5. CONCLUSION

L'étude a permis de présenter les différentes méthodes chimiométriques (PLSR et PTF) pour prédire la sorption de P dans les sols ferrallitiques de Madagascar. La comparaison entre ces deux méthodes ont montré que la fonction pédotransfert exprime plus la robustesse du modèle de P_{rem} avec un $R^2 = 0,74$ que la méthode PLSR avec un $R^2 = 0,61$. D'autant plus, la fonction PTF détermine les constituants minéraux et les propriétés physico-chimiques du sol contribuant à la sorption de P dans le sol. Les résultats du PTF ont montré que la fixation du P dans le sol est en fonction de la Gb, de Fe_2O_{3cbd} et du sable. Ces résultats ont montré que le P est libéré dans la solution du sol si les teneurs en Gb et Fe_2O_{3cbd} sont faibles et la teneur en sable est élevée. Dans le cas contraire, l'abondance en Gb et Fe_2O_{3cbd} favorisent alors à la forte fixation du P dans le sol. Ces résultats sont très encourageants pour continuer à améliorer les modèles de la sorption de P.

Remerciements

La recherche a été menée en collaboration avec le Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) d'Antananarivo, l'Institut de la Recherche pour le Développement (IRD) et l'UMR Eco&Sols Montpellier France, grâce à des soutiens financiers apportés par : Agropolis Fondation, le projet FABATROPIMED – Montpellier (France), et l'IFS (International Foundation for Science), Stockholm, Suède.

Références

- Camargo, L.A., Junior, J.M., Pereira, G.T., Alleoni, L.R.F. (2013). Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an oxisol at hillslope scale. *Catena*, 100, 100-106.
- Cécillon, L., Barthès, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Genot, V., Hedde, M., Stevens, a., Brun, J.J. (2009). Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *European Journal of Soil Sciences*, 60, 770-784.
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., Hurburgh, C.R. (2001). Near-infrared reflectance spectroscopy - principal components regression analyses of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 480-490.
- Cordell, D., Drangert, J.O., White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Glob. Environ. Chang.*, 19, 292-305.
- Core, T. R. (<https://www.R-project.org/>). R: a language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria*.
- Dubus, G., Becquer, T. (2001). Phosphorus sorption and desorption in oxide-rich Ferralsols of New Caledonia. *Soil Research*, 39(2), 403-414.
- Dunne, K.S., Holden, N.M., O'Rourke, S.M., Fenelon, A., Daly, K. (2020). Prediction of phosphorus sorption indices and isotherm parameters in agricultural soils using mid-infrared spectroscopy. *Geoderma*, 358, 113981.
- Frossard E., Achat D.L., Bernasconi S.M., Bünemann E.K., Fardeau J.C., Jansa J., Morel C., Rabeharisoa L., Randriamanantsoa L., Sinaj S., Tamburini F., Oberson A. (2011). The use of tracers to investigate phosphate cycling in soil-plant systems. *In Phosphorus in Action*, 59-91.
- Hunt, J., Ohno, T., He, Z., Honeycutt, C., Dail, D.B. (2007). Hunt, J., Ohno, T., He, Z., Honeycutt, C., Dail, D.B., 2007. Inhibition of phosphorus sorption to goethite,

- gibbsite, and kaolin by fresh and decomposed organic matter. *Biology and Fertility of Soils*, 44, 277–288.
- Janik, L.J., Skjemstad, J.O., Shepherd, K.D. and Spouncer, L.R. (2007). The prediction of soil carbon fractions using mid-infrared-partial least square analysis. *Australian Journal of Soil Research*, 45: 73-81.
- Le Bas, C. (2017). Concept de fonction de pédotransfert (FPT) pour estimer les propriétés hydriques des sols. *INRA SCIENCE&IMPACT. Projet financé par l'ANR - Rue des SOLS*, 17.
- McLaughlin M.J., McBeath T.M., Smernik R., Stacey S.P., Ajiboye B., Guppy, C. (2011). The chemical nature of P accumulation in agricultural soils - implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. *Plant and Soil*, 349(1-2), 69-87.
- Morón, A., Cozzolino, D. (2003). Exploring the use of near infrared reflectance spectroscopy to study physical properties and microelements in soils. *J. Near Infrared Spectrosc*, 11, 145-154.
- Pieri, C. (1975). Les propriétés électro-chimiques des colloïdes du sol et leurs conséquences agronomiques. 39.
- Pieri, C. (1977). Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal . *Agronomic Tropical*, XXXII, 4, 339-351.
- Pozza, A.A.A., Curi, N., Guilherme, L.R.G., Marques, J.J.G.S.M., Costa, E.T.S., Zuliani, D.Q., Motta, P.E.F., Martins, R.S., Oliveira, L.C.A. (2009). Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsite pedogenética. *Química Nova*, 32, 99–105.
- Rabeharisoa, L., Razanakoto, O.R., Razafimanantsoa, M.P., Rakotoson, T., Amery, F., Smolders, E. (2012). Larger bioavailability of soil phosphorus for irrigated rice compared with rainfed rice in Madagascar: results from a soil and plant survey. *Soil Use Manage*, 28, 448-456.

- Ramaroson H.V., Becquer T., Razafimahatratra H., Razakavololona A., Rabeharisoa L., Rakotondrazafy A.F.M. (2023). Prediction of phosphorus sorption index and availability by NIR and MIR in Madagascar. *Land* 12, 14.
- Ramaroson V.H., Becquer T., Sá S.O., Razafimahatratra H., Larvy Delarivière J., Blavet D., Vendrame P.R.S., Rabeharisoa L., Rakotondrazafy A.F.M. (2018). Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. *Catena*, 168, 102-109.
- Ramaroson, H. (2013). Potencial da espectroscopia NIR na predição de carbono em solos do . . *XXXIV Congr. Bras. Cienc. do solo*, 4 .
- Ramaroson, H. (2017). La spectrométrie infrarouge comme outil de caractérisation des constituants et des propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. *Thèse en cotutelle de l'Institut National des Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier et la Faculté de Sciences de l'Université d'Antananarivo*, 159.
- Rolim Neto, F.C., Schaefer, C.E.G.R., Costa, L.M., Corrêa, M.M., Fernandes Filho, E.I., Ibraimo, M.M. (2004). Adsorção de fósforo, superfície específica atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 953-964.
- Schaefer, C.E.G.R., Gilkes, R.J., Fernandes, R.B.A. (2004). EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. *Geoderma*, 123, 1–33.
- Soriano-Disla, J.M; Janik, L.J; Viscarra Rossel, R.A. (2014). Near-, and Mid-infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Applied Spectroscopy Reviews*, 49(2), 139-186.

- Uehara, G., et Gillman, G. (1981). The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. *Westview press*, Boulder, CO.
- Uehara, G., Keng J. (1975). Management implications of soil mineralogy in Latin America. *Publisher not identified*, 351-363.
- Vendrame, P.R.S., Marchão, R.L., Brunet, D., Becquer, T. (2012). The potential of NIR spectroscopy to predict soil texture and mineralogy in Cerrado Latosols. *European Journal of Soil Science*, 63, 743–753.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O. (2006). Visible, near-infrared, mid-infrared or cobined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131, 59-75.

Tableau 1. Distribution de la teneur de la Gb, Fe₂O_{3cbd}, Sable et le P_{rem} dans les sols ferrallitiques étudiés

Constituants	Unité	Min	Max	Moy	SD
Gb	g kg ⁻¹	0,0	456,2	109,9	116,9
Fe ₂ O _{3cbd}	g kg ⁻¹	0,0	181,4	42,4	30,5
S	g kg ⁻¹	426	901,6	451,6	199,1
P _{rem}	mg kg ⁻¹	1,2	47,4	23,1	9,5

N.B : P_{rem}= sorption de P ; Gb= Gibbsite ; Fe₂O_{3cbd}= Oxyhydroxide de fer par Citrate-Bicarbonate-Dithionite ; S= Sable

Tableau 2. Présentation des modèles de P_{rem} à partir de la méthode PLSR et de PTF

Equation	Méthode	R ² _c	RPD _c	R ² _c	RMSE
(1) P _{rem}	PLSR	0,70	1,8		
(2) P _{rem} = 25,61 – 0,035Gb-0,072 Fe ₂ O _{3cbd} +0,010S (mesurés)	PTF			0,46	6,89
(3) P _{rem} = 24,160 – 0,030Gb – 0,111 Fe ₂ O _{3cbd} +0.015S (prédits)	PTF			0,43	7,09

N.B : P_{rem}= sorption de P ; Gb= Gibbsite ; Fe₂O_{3cbd}= Oxyhydroxide de fer par Citrate-Bicarbonate-Dithionite ; S= Sable.

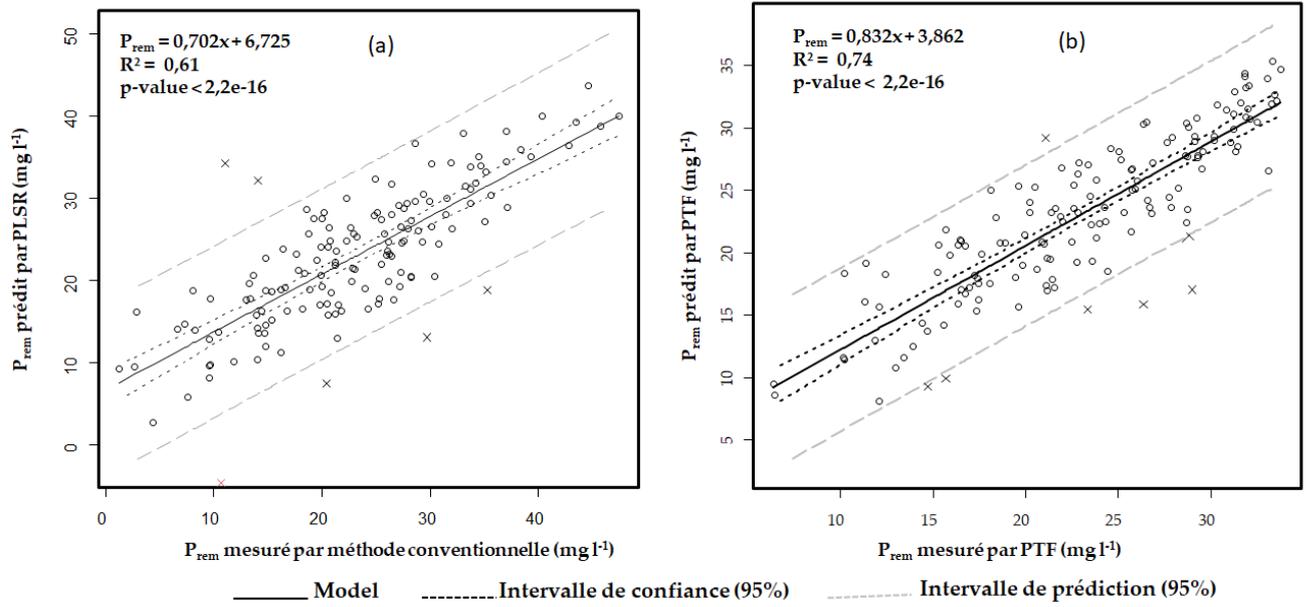


Figure 1. Comparaison des modèles de P_{rem} à partir de la méthode de PLSR (a) et de PTF (b)